



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 52668

(13) C2

(51) 7 G01R27/06

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВІНАХІД

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА СТОЯЧОЇ ХВИЛІ

1

2

(21) 99010338

(22) 21 01 1999

(24) 15 01 2003

(46) 15 01 2003, Бюл. № 1, 2003 р.

(72) Скрипник Юрій Олексійович, Шевченко Костянтин Леонідович, Іващенко Володимир Олексійович

(73) Державна академія легкої промисловості України, Товариство з обмеженою відповідальністю "Вікторія"

(56) Чернушенко А.М., Майбородин А.В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн М, Радио и связь, 1986, с.99-102

(57) Пристрій для вимірювання коефіцієнта стоячої хвилі, що містить надвисокочастотний генератор, до виходу якого підключені послідовно з'єднані амплітудний модулятор, надвисокочастотний атенуатор, спрямований відгалужувач відбитої хвилі і антена, низькочастотний генератор, з'єднаний з керуючим входом амплітудного модулятора, надвисокочастотний детектор і цифровий вольтметр, який відрізняється тим, що в нього введені надвисокочастотний ключ, включений між спрямованим відгалужувачем відбитої хвилі і антеною,

подіпник частоти, вхід якого з'єднаний з виходом низькочастотного генератора, а вихід з'єднаний з керуючим входом надвисокочастотного ключа, коло з послідовно з'єднаних вибіркового регульованого підсилювача, настроєного на частоту низькочастотного генератора, амплітудного детектора і коренювального перетворювача, вхід кола підключений до виходу надвисокочастотного детектора, коло з послідовно з'єднаних фільтра верхніх частот, підсилювача змінної напруги і фазочутливого випрямляча, керуючий вхід якого підключений до виходу подіпника частоти, коло з послідовно з'єднаних фільтра нижніх частот і підсилювача постійної напруги, входи фільтрів нижніх частот та верхніх частот підключені до виходу коренювального перетворювача, джерело опорної напруги, диференціальний підсилювач, один вхід якого з'єднаний з виходом джерела опорної напруги, інший вхід з'єднаний з виходом фазочутливого випрямляча, інтегратор, включений між виходом диференціального підсилювача і керуючим входом вибіркового регульованого підсилювача, а цифровий вольтметр підключений до виходу підсилювача постійної напруги

Винахід має відношення до техніки виміру надвисоких частот (НВЧ) і може бути використаний для оцінки відгалужувальної спроможності різноманітних матеріалів і середовищ, наприклад, технологічних розчинів в діапазоні НВЧ по значенню коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ)

Зміна діелектричних властивостей матеріалів і середовищ в НВЧ діапазоні тісно зв'язана з кількістю води, що в них міститься. Застосування апаратури, яка реєструє зміни відбитого від середовища чи матеріалу НВЧ сигналу, дозволяє безконтактне одержувати різноманітну інформацію про стан об'єкту, який контролюється. По значенням КСХ можна одержувати інформацію, наприклад, про вологість матеріалу, про концентрацію технологічних розчинів. В деяких випадках, базуючись на інформації про значення КСХ, може здійснюватись оцінка стану біологічних об'єктів та діаг-

ностика деяких внутрішніх захворювань людини (див. Хитров Ю.А., Шестиперов В.А. СВЧ в медицине - Обзор по электронной технике, сер. I. Электроника СВЧ, 1983. Вып. 16(998), ст. 40-49.)

Коефіцієнт стоячої хвилі визначається відношенням максимального значення напруги (або струму) до мінімального значення напруги (або струму) вздовж однорідної лінії

$$K_x = U_{\max} / U_{\min} = I_{\max} / I_{\min}$$

В залежності від відгалужувальної спроможності об'єкту K_x змінюється від 1 до ∞ . Повному відбиванню від об'єкту сигналу НВЧ відповідає нескінченно великий K_x .

Відомий пристрій для виміру коефіцієнта стоячої хвилі (див. Измерения в электронике. Справочник / В.А. Кузнецов, Р.А. Боргов, В.М. Коневских и др., Под ред. В.А. Кузнецова - М.

(13) C2

(11) 52668

(19) UA

Енергоатомиздат, 1987, ст 219-221), що містить генератор НВЧ, до виходу якого підключені послідовно з'єднані вентиль, атенюатор і вимірювальна лінія, що обладнана кареткою з рухомим зондом і елементами погодження, НВЧ детектор, підключений до виходу зонда, і індикатор, з'єднаний з виходом атенюатора. До виходу вимірювальної лінії підключений об'єкт, що досліджується. Вимір малих і середніх значень коефіцієнта стоячої хвилі ($K_x < 10$) визначають шляхом безпосереднього виміру мінімального і максимального показань індикатора при переміщенні каретки із зондом вздовж вимірювальної лінії. При квадратичному детекторі

$$K_x = \sqrt{U_{\max} / U_{\min}}$$

При вимірі $K_x > 3$ мінімальні значення сигналу, що вимірюється, стають занадто малими у порівнянні з максимальним, і похибка вимірів зростає. При $K_x > 10$ похибки виміру одержуються неприпустимо великими (більше 15-20%).

Відомий також пристрій для виміру коефіцієнта стоячої хвилі (див. Чернушенко А. М., Майбородин А. В. Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазонов волн / Под ред. А. М. Чернушенко - М. Радио и связь, 1980, с. 99-102), що містить НВЧ генератор, до виходу якого підключені послідовно з'єднані амплітудний модулятор, НВЧ атенюатор, направлений відгалужувач відбитої хвилі і антена, низькочастотний генератор, з'єднаний з керуючим входом амплітудного модулятора, НВЧ детектор і вольтметр. Крім того, пристрій містить направлений відгалужувач хвиль, що падають, другий НВЧ детектор, підключений до виходу направленного відгалужувача хвиль, що падають, і блок обчислення відношення двох напруг, з'єднаний входами з виходами двох НВЧ детекторів, а вольтметр підключений до виходу блоку обчислення двох напруг.

В відомому пристрої безпосередньо вимірюється коефіцієнт відбивання з співвідношення

$$\Gamma = \sqrt{P_0 / P_n}$$

де P_0 - потужність відбитої хвилі,

P_n - потужність хвилі, що падає. Коефіцієнт стоячої хвилі визначається побічно по формулі

$$K_x = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} = \frac{1 + \sqrt{P_0 / P_n}}{1 - \sqrt{P_0 / P_n}}$$

Шкала вольтметра, проградуирована в одиницях K_x у відповідності з розрахунковою формулою має нерівномірний характер: вона стиснута в області великих значень K_x . Це є однією з причин збільшення похибки виміру при $K_x > 3$. Крім того, похибка виміру K_x різко збільшується при великих значеннях $K_x (> 10)$, бо знаменник розрахункової формули прагне до нуля і невеликі похибки в значеннях коефіцієнта відбивання Γ призводять до великих похибок виміру K_x .

Суттєвим джерелом похибок є немінуча нестабільність і неідентичність каналів відбитих хвиль і хвиль, що падають. Це зумовлено передусім нерівністю коефіцієнтів передачі направлених відгалужувачів хвиль, що падають і відбитих хвиль, відмінністю в чутливості двох НВЧ детекторів, двох згладжуючих фільтрів, підсилювачів і

інших елементів двоканального вимірювача відношення напруг, що порівнюються. При вимірі K_x по напрузі (КСХН) необхідно введення двох кореневилучаючих перетворювачів, які мають, як правило, низькі метрологічні характеристики. Все це зумовлює низьку точність виміру коефіцієнта стоячої хвилі.

В основу винаходу покладена задача створення такого пристрою для виміру коефіцієнта стоячої хвилі, в якому введення нових елементів і зв'язків дозволило б забезпечити підвищення точності виміру коефіцієнта стоячої хвилі в області великих значень.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрій для виміру коефіцієнта стоячої хвилі, що містить надвисокочастотний генератор, до виходу якого підключені послідовно з'єднані амплітудний модулятор, надвисокочастотний атенюатор, направлений відгалужувач відбитої хвилі і антена, низькочастотний генератор, з'єднаний з керуючим входом амплітудного модулятора, надвисокочастотний детектор і вольтметр, згідно винаходу введені надвисокочастотний ключ, включений між направленим відгалужувачем відбитої хвилі і антеною, дільник частоти, вхід якого з'єднаний з виходом низькочастотного генератора, а вихід з'єднаний з керуючим входом надвисокочастотного ключа, ланцюг з послідовно з'єднаних вибіркового регульованого підсилювача, налаштованого на частоту низькочастотного генератора, амплітудний детектор і кореневилучаючий перетворювач, вхід ланцюга підключено до виходу надвисокочастотного детектора, ланцюг з послідовно з'єднаних фільтру верхніх частот, підсилювача змінної напруги і фазочутливого випрямляча, керуючий вхід якого підключено до виходу дільника частоти, ланцюг з послідовно з'єднаних фільтру нижніх частот і підсилювача постійної напруги, входи фільтрів низької частоти та високої частоти підключені до виходу кореневилучаючого перетворювача, джерело опорної напруги, диференціальний підсилювач, один вхід якого з'єднаний з виходом джерела опорної напруги, інший вхід з'єднаний з виходом фазочутливого випрямляча, інтегратор, включений між виходом диференціального підсилювача і керуючим входом вибіркового регульованого підсилювача, а вольтметр підключений до виходу підсилювача постійної напруги.

Введення в НВЧ тракт тільки одного направленного відгалужувача з НВЧ ключем, працюючим на відбивання, включення в одноканальний тракт відпрацювання відбитих НВЧ коливаний вибіркового регульованого підсилювача, налаштованого на частоту модуляції сигналу, що випромінюється, амплітудного детектора і одного кореневилучаючого перетворювача, розподіл вихідного сигналу одноканального тракту на змінну і постійну складові фільтрами

верхніх і нижніх частот відповідно, управління коефіцієнтом підсилення вибіркового підсилювача різницевою напругою, яка отримана в результаті порівняння випрямленої синхронним детектором змінної напруги зі стабілізованою опорною напругою, управління НВЧ ключем і синхронним детектором вихідною напругою дільника частоти, підключеного до низькочастотного генератора

модулюючої частоти і вимірювання постійної складової напруги, виділеної фільтром, забезпечують лінійну залежність вихідної постійної напруги від коефіцієнта, стоячої хвилі, що вимірюється і виключають вплив нестабільності параметрів одноканального перетворювального тракту і непостійності потужності НВЧ генератора, що забезпечує підвищення точності виміру коефіцієнта стоячої хвилі, особливо в області великих значень

На кресленні приведена функціональна схема пристрою для виміру коефіцієнта стоячої хвилі

Пристрій містить НВЧ генератор 1, до виходу якого підключені послідовно з'єднані амплітудний модулятор 2, НВЧ атенюатор 3, направлений відгалужувач 4 відбитої хвилі, НВЧ ключ 5 і антена 6, що опромінює об'єкт 7. До виходу направлено відгалужувача 4 підключені послідовно з'єднані НВЧ детектор 8, вибіркового регульований підсилювач 9, амплітудний детектор 10 і кореневилучаючий перетворювач 11. До виходу кореневилучаючого перетворювача підключені послідовно з'єднані фільтр 12 верхніх частот, підсилювач 13 змінної напруги і фазочутливий випрямляч 14, вихід якого з'єднаний з одним входом диференціального підсилювача 15, інший вхід якого з'єднаний з виходом джерела 16 стабілізованої опорної напруги. До виходу диференціального підсилювача підключений вхід інтегратора 17, вихід якого з'єднаний з керуючим входом вибіркового регульованого підсилювача 9. До виходу кореневилучаючого перетворювача 11 також підключені послідовно з'єднані фільтр 18 нижніх частот, підсилювач 19 постійної напруги і цифровий вольтметр 20. Низькочастотний генератор 21 з'єднаний з керуючим входом амплітудного модулятора 2 і з входом дільника частоти 22, вихід якого з'єднаний з керуючими входами НВЧ ключа і синхронного детектора.

Пристрій для виміру коефіцієнта стоячої хвилі працює таким чином

Сигнал НВЧ генератора 1 надходить на амплітудний модулятор 2, де модулюється напругою низькочастотного генератора 21. Амплітудно-модульований НВЧ сигнал з глибиною модуляції m через НВЧ атенюатор 3 і направлений відгалужувач 4 відбитої хвилі надходить на НВЧ ключ 5, що виконаний на рп-діодах. НВЧ ключ управляється низькочастотною прямокутною напругою, що формується дільником частоти 22 з напруги низькочастотного генератора 21.

В закритому стані НВЧ ключ 5 працює по принципу відбивання НВЧ сигналу. Коли ключ відкритий, модульований НВЧ сигнал від НВЧ атенюатора 3 надходить в антену 6 і випромінюється в направленні досліджуваного об'єкта 7. Відбитий від об'єкта модульований сигнал знов надходить на антену 6 і через відкритий НВЧ ключ 5 влучає на вхід направлено відгалужувача 4 відбитої хвилі. Відгалужений модульований НВЧ сигнал детектується НВЧ детектором 8, в результаті чого на його виході виділяється напруга низькочастотної огибаючої. Амплітуда напруги огибаючої U_1 при квадратичній характеристиці НВЧ детектора визначається виразом

$$U_1 = k_1 k_2 S_1 m^2 \Gamma^2 P_0, \quad (1)$$

де k_1 - коефіцієнт передачі атенюатора 3,

k_2 - коефіцієнт передачі направлено відга-

лужувача 4,

S_1 - чутливість НВЧ детектора 8,

Γ - коефіцієнт відбивання об'єкта 7,

P_0 - потужність НВЧ генератора 1.

Коли НВЧ ключ 5 закривається, модульований НВЧ сигнал з виходу атенюатора 3 повністю відбивається і влучає також на вхід направлено відгалужувача 4. Амплітуда напруги огибаючої U_2 при цьому буде мати вигляд

$$U_2 = k_1 k_2 S_1 m^2 P_0 \quad (2)$$

Так як частота комутації ключа 5 менше частоти низькочастотного генератора завдяки дільнику частоти 22, напруги огибаючих на виході НВЧ детектора 8 при безперервній роботі НВЧ ключа 5 будуть мати вигляд послідовності пакетів низькочастотних напруг з амплітудами U_1 і U_2 .

Пакети напруг огибаючої посилюються вибіркоким підсилювачем 9 низької частоти, що настроєний на частоту генератора 21. Посилена напруга знов детектується по амплітуді детектором 10. На виході амплітудного детектора 10 формуються відеоімпульси з амплітудами

$$U_3 = k_1 k_2 S_1 k_3 m^2 \Gamma^2 P_0 \quad (3)$$

$$U_4 = k_1 k_2 S_1 k_3 m^2 P_0 \quad (4)$$

де k_3 - регульований коефіцієнт підсилення підсилювача 9,

S_2 - чутливість амплітудного детектора 10.

Послідовність відеоімпульсів функціонально перетворюється в кореневилучаючому перетворювачі 11, в результаті чого амплітуди відеоімпульсів приймають значення

$$U_5 = S_0 m \Gamma \sqrt{P_0} \quad (5)$$

$$U_6 = S_0 m \sqrt{P_0} \quad (6)$$

де $S_0 = \sqrt{k_1 k_2 S_1 k_3 S_2 S_3}$ - результуюча крутість перетворення одноканального тракту,

S_3 - чутливість кореневилучаючого перетворювача 11.

З послідовності відеоімпульсів з амплітудами U_5 і U_6 фільтром 12 верхніх частот виділяється змінна складова напруги з частотою комутації і амплітудою

$$U_7 = k_4 \frac{U_6 - U_5}{2} = 0,5 k_4 S_0 m (1 - \Gamma) \sqrt{P_0} \quad (7)$$

де k_4 - коефіцієнт передачі фільтру 12.

Виділена фільтром напруга посилюється підсилювачем 13 змінної напруги і випрямляється синхронним детектором 14, що, як і НВЧ ключ, управляється вихідною напругою дільника частоти 22. Випрямлена напруга приймає вигляд

$$U_8 = k_5 k_6 U_7, \quad (8)$$

де k_5 - коефіцієнт підсилення підсилювача 13,

k_6 - коефіцієнт передачі синхронного детектора 14.

Напруга U_8 прямує на один вхід диференціального підсилювача 15, на інший вхід якого прямує опорна напруга $U_0 = \text{const}$ зі стабілізованого джерела напруги 16. Різницева напруга з виходу диференціального підсилювача заряджає інтегратор 17, вихідна напруга якого прямує на керуючий вхід регульованого вибіркового підсилювача 9. Направлення регулювання коефіцієнта підсилення k_3 вибране таким, щоб різниця вхідних напруг диференціального підсилювача 15 прагнула до нуля.

При досягненні рівності вхідних напруг диференціального підсилювача маємо

$$k_5 k_6 U_7 = U_0, \quad (9)$$

або з урахуванням виразу (7) одержуємо

$$U_0 = 0,5 k_4 k_5 k_6 S_0 m (1 - \Gamma) \sqrt{P_0} \quad (10)$$

Результуючу крутість перетворення одноканального тракту S_0 уявимо в вигляді

$$S_0 = \sqrt{k_3 S'_0} \quad (11)$$

де $S'_0 = \sqrt{k_1 k_2 S_1 S_2 S_3}$ - постійна нерегульована частина крутості перетворення. Підставляючи значення S_0 з виразу (11) в (10) і вирішуючи отримане рівняння відносно коефіцієнта підсилення k_3 регульованого підсилювача, одержуємо

$$k_3 = \left(\frac{2U_0}{k_4 k_5 k_6 S'_0 (1 - \Gamma) \sqrt{P_0}} \right)^2 \quad (12)$$

Таким чином, коефіцієнт підсилення вибіркового підсилювача 9 автоматично приймає значення (12)

З послідовності відеоімпульсів з амплітудами U_5 і U_6 фільтром 18 нижніх частот виділяється також постійна складова напруги

$$U_9 = k_7 \frac{U_5 + U_6}{2} \quad (13)$$

де k_7 - коефіцієнт передачі фільтру 18 нижніх частот

Постійна напруга U_9 посилюється підсилювачем 19 постійної напруги і вимірюється вольтметром 20

Напруга, що вимірюється

$$U_{10} = 0,5 k_7 k_8 \sqrt{k_3} S'_0 m (1 - \Gamma) \sqrt{P_0} \quad (14)$$

з урахуванням значення коефіцієнта підсилення k_3 з співвідношення (12) приймає вигляд

$$U_{10} = \frac{k_7 k_8 (1 + \Gamma)}{k_4 k_5 k_6 (1 - \Gamma)} U_0 \quad (15)$$

Коефіцієнт передачі фільтру 12 верхніх частот вибирають рівним коефіцієнту передачі фільтру 18 нижніх частот ($k_4 = k_7$), а коефіцієнт підсилення підсилювача 13 змінної напруги з урахуванням коефіцієнта передачі синхронного детектора 14 встановлюють рівним коефіцієнту підсилення підсилювача 19 постійної напруги ($k_5 k_6 = k_8$). При виконанні цих умов напруга, що вимірюється вольтметром 20 стає рівним

$$U_{10} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} U_0 \quad (16)$$

Так як опорна напруга $U_0 = \text{const}$, то напруга, що вимірюється прямопропорційна коефіцієнту стоячої хвилі

$$U_{10} = K_x U_0 \quad (17)$$

Межі виміру K_x змінюються зміною опорної напруги U_0 . Завдяки автоматичному регулюванню коефіцієнта підсилення вибіркового підсилювача 9 на результат виміру не впливає нестабільність параметрів елементів, що входять в одноканальний тракт перетворення (k_2, S_1, k_3, S_2, S_3). Рівень опромінювання об'єкту 7 задається атенуатором 3, але непостійність його коефіцієнта передачі k_1 також не впливає на результат виміру. Не впливає також на результат виміру і непостійність потужності P_0 НВЧ генератора 1. Так як коефіцієнт K_x в розглянутому пристрої вимірюється безпосередньо, то точність виміру з зростанням його значення не знижується. Тому коефіцієнт стоячої хвилі доцільно використовувати для виміру великих розоспасавань з об'єктом, що досліджується ($K_x > 10$)

У порівнянні з відомими приладами з двоканальною структурою одноканальний вимірювач K_x не вимагає підбору однакових елементів: направлених відгалужувачів, НВЧ детекторів, підсилювачів, кореневилучаючих перетворювачів і інших парних елементів з нестабільними характеристиками. Так, НВЧ детектори, навіть при цілком ідентичних конструкціях детекторних секцій і однакових вольт-амперних характеристиках діодів по постійному струму в діапазоні НВЧ можуть сильно відрізнятись по своєму повному опору, а отже, і по чутливості. Ще більш важко забезпечити ідентичність двох кореневилучаючих перетворювачів, що реалізуються з допомогою нелінійних елементів.

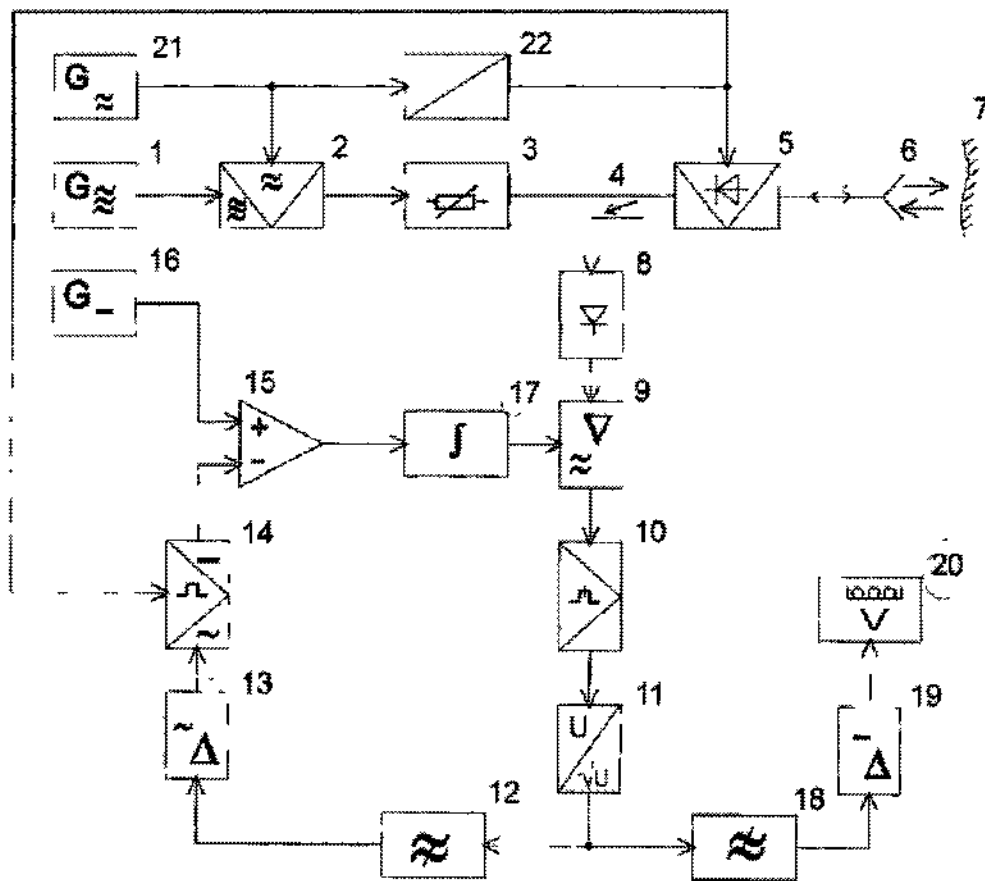
Шкала вольтметра 20 проградуєвана у відповідності з формулою

$$K_x = \frac{\sqrt{P_n} + \sqrt{P_{от}}}{\sqrt{P_n} - \sqrt{P_{от}}} \quad (18)$$

де P_n - потужність хвилі, що падає,

$P_{от}$ - потужність відбитої хвилі

В відповідності з виразом (17) шкала вимірювача K_x лінійна і рівномірна в відзнаці від нерівномірних шкал відомих вимірювачів. Дослідження показали, що похибка одноканальних вимірювачів K_x не перевищує $\pm 0,5\%$ в діапазоні значень 3-50 на частотах 0,5-30 ГГц.



Фиг.